

SKRIPSI

**SIMULASI PEMBENTUKAN SUMUR ARTESIS PADA
SISTEM AKUIFER TERTEKAN KOTA PAREPARE
PROVINSI SULAWESI SELATAN**

Disusun dan diajukan oleh:

**A. SUCI PUJI ASTUTI
D111 19 1030**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**SIMULASI PEMBENTUKAN SUMUR ARTESIS PADA
SISTEM AKUIFER TERTEKAN KOTA PAREPARE
PROVINSI SULAWESI SELATAN**

Disusun dan diajukan oleh

**A. SUCI PUJI ASTUTI
D111191030**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 15 September 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, MT
NIP. 196807181993091001

Asta Arjunoarwan Hatta, ST., MT
NIP. 199511262022043001

Ketua Program Studi,



Dr. Aryanti Virtanti Anas, ST., MT.
NIP. 197010052008012026

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;
Nama : A. Suci Puji Astuti
NIM : D111191030
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Simulasi Pembentukan Sumur Artesis Pada Sistem Akuifer Tertekan
Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 15 September 2023

Yang Menyatakan



A. Suci Puji Astuti

ABSTRAK

A. SUCI PUJI ASTUTI. SIMULASI PEMBENTUKAN SUMUR ARTESIS PADA AKUIFER TERTEKAN KOTA PAREPARE PROVINSI SULAWESI SELATAN (dibimbing oleh Muhammad Ramli dan Asta Arjunoarwan Hatta).

Dalam peta Cekungan Air Tanah (CAT) Indonesia yang dikeluarkan oleh Kementerian Energi Sumberdaya Mineral (ESDM), Kota Parepare tidak termasuk dalam salah satu daerah yang memiliki cekungan air tanah di Indonesia. Namun, pemanfaatan air tanah dilakukan melalui sumur bor dan beberapa tempat ditemukan keadaan artesis. Hal ini menunjukkan adanya keterbatasan informasi terkait penyebaran keberadaan sistem air tanah. Tujuan dari penelitian adalah merekonstruksi model konseptual akuifer untuk mengetahui pembentukan sumur artesis dan menganalisis aliran air tanah pada sistem akuifer tertekan menggunakan simulasi numerik. Manfaat dari penelitian ini dapat dijadikan sebagai dasar dalam perumusan model konseptual cekungan air tanah Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan. Metode penelitian yang digunakan adalah metode beda hingga (*finite difference method*) dengan menggunakan *software* vizual modflow flex 2013.1. Hasil penelitian diperoleh bahwa daerah model tersusun oleh endapan aluvium (batupasir dan batulempung) dan batuan vulkanik (tufa, breksi padu, dan breksi tertekar). Daerah model terdiri atas 6 lapisan yaitu akuifer bebas berupa batupasir dan tufa, lapisan akuiklud berupa batulempung, lapisan akuifer tertekan berupa breksi tertekar dan lapisan akuifuk berupa breksi padu. Pembentukan sumur artesis di daerah model terdapat pada akuifer tertekan berupa breksi terkekar dengan ketebalan rata-rata 45 meter. Pola aliran air tanah pada daerah model mengikuti arah kondisi topografi, yaitu dari bagian Timur mengarah ke bagian Barat (pesisir air laut Selat Makassar) dengan nilai *head* yang dihasilkan yaitu antara 0-199 mdpl. Nilai *head* masing-masing sumur artesis yaitu 33 mdpl, 29 mdpl, dan 19 mdpl. Hasil pemodelan air tanah diperoleh bahwa air tanah pada 0-42 mdpl dikategorikan sebagai zona artesis. Penampang tinggi muka air tanah daerah model menunjukkan bahwa diperoleh 3 zona artesis. Hasil kalibrasi dan validasi model diperoleh nilai koefisien korelasi (r) yang dihasilkan antara hasil observasi dan simulasi yaitu sebesar 0,92 dan nilai *Root Mean Square* (RMS) yang dihasilkan sebesar 10,35 meter dengan *normalized* RMS sebesar 14,4%.

Kata Kunci: Air tanah; Sistem Akuifer; Artesis; Model air tanah; Simulasi Numerik

ABSTRACT

A. SUCI PUJI ASTUTI. SIMULATION OF ARTESIAN WELL FORMATION IN A CONFINED AQUIFER IN PAREPARE CITY, SOUTH SULAWESI PROVINCE (supervised by Muhammad Ramli dan Asta Arjunoarwan Hatta).

In the Indonesian Groundwater Basin map issued by the Ministry of Energy and Mineral Resources, Parepare City is not included in one of the areas that have groundwater basins in Indonesia. However, the use of groundwater is done through drilled wells and artesian conditions are found in several places. This shows that there is limited information related to the distribution of the presence of groundwater systems. The aim of this research is to reconstruct the aquifer conceptual model to determine the formation of artesian wells and to analyze groundwater flow in confined aquifer systems using numerical simulations. The benefits of this research can be used as a basis for the formulation of a groundwater conceptual model for the City of Parepare, South Sulawesi Province. The research method used is the finite difference method using the Visual Modflow Flex 2013.1 software. The results showed that the model area is composed of alluvium deposits (sandstones and claystones) and volcanic rocks (tufa, massive breccias, and fracture breccias). The model area consists of 6 layers, namely free aquifers in the form of sandstones and tuffs, aquiclude layers in the form of claystone, aquifer layers in the form of fracture breccias and aquifer layers in the form of massive breccias. The formation of artesian wells in the model area occurs in confined aquifers in the form of fractured breccias with an average thickness of 45 meters. The pattern of groundwater flow in the model area follows the direction of topographical conditions, namely from the east to the west (coastal seawater in the Makassar Strait) with a resulting head value of between 0-199 masl. The head values of each artesian well are 33 masl, 29 masl and 19 masl. Groundwater modeling results show that groundwater at 0-42 masl is categorized as an artesian zone. A cross-section of the groundwater level in the model area shows that 3 artesian zones are obtained. The results of the calibration and validation of the model show that the correlation coefficient (r) is 0.92 between the observed and calculated results and the resulting Root Mean Square (RMS) value is 10.35 meters with a normalized RMS of 14.4%.

Keywords: Groundwater; Aquifer System; Artesian; Groundwater Models; Numerical Simulation.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR LAMPIRAN.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Hidrologi.....	5
2.2 Air Tanah.....	8
2.3 Sumur Artesis.....	14
2.4 Sistem Akuifer.....	16
2.5 Pemodelan Air tanah.....	24
2.6 Program Visual MODFlow.....	31
2.7 Metode Beda Hingga (<i>Finite Difference Method</i>).....	31
BAB III METODE PENELITIAN.....	33
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	33
3.2 Alat Penelitian.....	34
3.3 Teknik Pengumpulan Data.....	34
3.4 Teknik Analisis.....	35
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	38
4.1 Konseptual Model.....	38
4.2 Pemodelan Numerik.....	48
4.3 Pembentukan Sumur Artesis.....	55
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	59
5.1 Kesimpulan.....	59
5.2 Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA.....	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Siklus hidrologi	6
Gambar 2. Ilustrasi air tanah	9
Gambar 3. Penyebaran vertikal air tanah	14
Gambar 4. Skenario geologis sumur artesis	15
Gambar 5. Distribusi aliran sumur artesis	16
Gambar 6. Sistem akuifer bebas dan tertekan	17
Gambar 7. Tahapan pemodelan air tanah	27
Gambar 8. Peta lokasi penelitian	33
Gambar 9. Bagan alir penelitian	37
Gambar 10. <i>Boundary domain</i> konseptual model	39
Gambar 11. Lokasi titik log bor sumur	39
Gambar 12. Diagram pagar model geologi	40
Gambar 13. Susunan horison daerah model	42
Gambar 14. Susunan litologi daerah model 2D	43
Gambar 15. Susunan litologi daerah model 3D	43
Gambar 16. Litologi (zona) daerah model	44
Gambar 17. <i>Boundary condition</i> model konseptual	47
Gambar 18. Rancangan grid daerah model	48
Gambar 19. <i>Convert</i> konseptual model	49
Gambar 20. Grid geometri sistem akuifer (a) pada baris (b) dan kolom (c) ke 20	49
Gambar 21. Grid geometri sistem akuifer (a) pada baris (b) dan kolom (c) ke 40	49
Gambar 22. Grid geometri sistem akuifer (a) pada baris (b) dan kolom (c) ke 60	50
Gambar 23. Grid geometri sistem akuifer (a) pada baris (b) dan kolom (c) ke 80	50
Gambar 24. Rancangan grid kondisi batas	51
Gambar 25. Simulasi model aliran air tanah	52
Gambar 26. Titik sumur observasi	53
Gambar 27. Hasil validasi model	54
Gambar 28. Titik sumur artesis	55
Gambar 29. Garis penampang sumur artesis	56
Gambar 30. Penampang MAT sumur artesis 1 dan 2	57
Gambar 31. Penampang MAT sumur artesis 3	57
Gambar 32. Zona artesis	58

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Sebaran dan sumber air di bumi.....	8
Tabel 2. Porositas batuan.....	20
Tabel 3. Nilai konduktivitas hidrolik batuan.....	21
Tabel 4. Nilai konduktivitas hidrolik litologi batuan	22
Tabel 5. Komponen konseptual model.....	28
Tabel 6. Kondisi batas model.....	29
Tabel 7. Data <i>log bor</i> sumur.....	41
Tabel 8. Susunan zona litologi	42
Tabel 9. Ketebalan litologi	44
Tabel 10. Nilai konduktivitas hidrolik	45
Tabel 11. Nilai parameter <i>constant head</i>	46
Tabel 12. Nilai parameter <i>river</i>	46
Tabel 13. Data sumur observasi	53
Tabel 14. Perbandingan antara bidang piesometer simulasi dan terukur	54
Tabel 15. Harga koefisien korelasi.....	55

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Peta geologi	65
Lampiran 2 Data <i>log bor</i>	67
Lampiran 3. Data geolistrik.....	77
Lampiran 4. Peta topografi.....	77
Lampiran 5. Tahapan pemodelan air tanah	89
Lampiran 6. Kartu konsultasi tugas akhir	101

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* atas segala Rahmat dan karunia-Nya sehingga Tugas Akhir dengan judul “Simulasi Pembentukan Sumur Artesis pada Sistem Akuifer Tertekan Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan” dapat terselesaikan. Selawat dan salam kepada Nabi Muhammad *Shallallahu 'Alaihi Wasallam* sebagai manusia pilihan dan senantiasa menjadi sumber inspirasi dan teladan terbaik untuk seluruh umat manusia.

Tugas akhir ini berhasil diselesaikan tidak lepas atas bantuan, dukungan, bimbingan serta saran-saran dari berbagai pihak yang terlibat. Untuk itu, dengan segala kerendahan hati dan penuh kebanggaan penulis ucapkan terima kasih kepada Bapak Andi Firdaus Djollong, S.E., M.Si. selaku Direktur Utama Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melaksanakan penelitian. Ibu Maprani, S.T. selaku Manager Teknik dan Operasi PDAM Kota Parepare yang telah membantu penulis selama melaksanakan penelitian.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Ibu Dr. Aryanti Virtanti Anas S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Bapak Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, M.T., dan Bapak Asta Arjunoarwan Hatta, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang dengan sabar dan professional telah memberikan bimbingan dan arahan, memfasilitasi, membantu dan memberikan dukungan yang sangat luar biasa kepada penulis selama pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih kepada Bapak Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T. dan Bapak Akmal Saputno, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, kritikan, dan masukan untuk menyempurnakan tugas akhir ini. Terima kasih kepada seluruh dosen dan staff administrasi Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin yang telah melaksanakan tugas dan tanggungjawabnya dengan baik serta membantu penulis selama pelaksanaan penelitian.

Terima kasih kepada seluruh warga Persatuan Mahasiswa Tambang Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin (PERMATA FT-UH), teman-teman seperjuangan Teknik Pertambangan Angkatan 2019, dan seluruh anggota

Laboratorium Lingkungan Tambang yang telah membantu, menghibur dan memberi semangat yang luar biasa kepada penulis selama pelaksanaan penelitian. Terima kasih pula penulis ucapkan kepada sahabat tercinta Salman, Rivaldo Pratama, dan Miftah Hujannah yang senantiasa membantu, mendukung dan menghibur penulis selama berkuliah dan selama pelaksanaan penelitian ini.

Ucapan terima kasih yang sangat istimewa kepada segenap keluarga yaitu Ibu Andi Asniati dan Bapak Andi Muh. Amin serta ibu sambung Andi Niswati selaku orang tua penulis yang senantiasa mendoakan, memotivasi, mendukung dan menjadi alasan utama bagi penulis untuk menyelesaikan penelitian ini. Terima kasih kepada Andi Wulandari Amin dan Andi Bobby Maulana selaku kakak penulis dan Andi Alfian selaku adik penulis yang telah memberikan bantuan materi dan moril kepada penulis selama pelaksanaan penelitian.

Tugas akhir ini telah disusun dengan sebaik mungkin dengan harapan dapat bermanfaat bagi setiap pembaca. Namun, tentunya dengan segala keterbatasan yang ada masih ditemukan kekurangan didalamnya. Kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan bagi penulis untuk perbaikan kedepannya.

Gowa, September 2023

Penyusun,

A. Suci Puji Astuti

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air merupakan kebutuhan hidup yang sangat penting. Sekitar 0,3% dari sumber daya air di dunia dapat digunakan. Kekurangan air sudah terjadi di beberapa tempat. Situasi ini merupakan salah satu indikator utama sehingga perlunya kesadaran akan sumber daya air seiring dengan bertambahnya populasi dunia yang menyebabkan kebutuhan air juga meningkat. Sumber daya air sangat penting untuk menjaga persediaan makanan yang cukup dan lingkungan yang produktif bagi semua organisme hidup (Kilic, 2020).

Kebutuhan manusia akan air semakin hari semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan hidup di perkotaan maupun pedesaan. Peningkatan jumlah penduduk di suatu daerah juga menjadi salah satu penyebab meningkatnya kebutuhan air. Kebutuhan air yang terus meningkat dapat ditutupi oleh penggunaan air tanah. Upaya pemanfaatan air tanah memerlukan penentuan kuantitas dan kualitas air tanah yang ada dalam akuifer (Listyani dan Thomas, 2020).

Air tanah adalah air yang tertinggal di bawah permukaan tanah oleh air yang telah tersaring dari permukaan bumi dan meresap ke dalam lapisan yang lebih rendah. Infiltrasi air tanah melewati zona tak jenuh menuju ke zona jenuh yang terdapat pada bagian atas disebut *water table* dan bagian bawah disebut *groundwater* (Wanielista, 1990). Air tanah memiliki keunggulan yang lebih dibandingkan dengan sumber daya air permukaan seperti ketersediannya selama musim kemarau, kemudahan dan biaya pengembangan yang rendah (pemasangan sumur) dan umumnya berkualitas baik (McDonald & Harbaugh, 1998).

Akuifer merupakan suatu formasi geologi yang jenuh air. Akuifer mempunyai kemampuan untuk menampung dan meluluskan air. Bentuk dan kedalaman akuifer terbentuk bersamaann dengan terbentuknya cekungan air tanah (Rejekiningrum, 2009). Proses pembentukan akuifer dan karakteristik air tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu pembentukan (genes) yang menunjukkan proses geomorfologi terdahulu, kondisi lingkungan pengendapan pada saat pembentukan batuan, komposisi mineral batuan penyusun akuifer, proses dan pola pergerakan air

tanah di dalam akuifer serta waktu pengendapan air tanah yang terjebak dalam lapisan batuan (Appelo dan Postma, 1994).

Air tanah dapat dibedakan atas air tanah tertekan dan tidak tertekan. Air tanah tertekan atau lebih dikenal sebagai air tanah dalam (*groundwater*) atau air artesis, yaitu air yang berasal dari lapisan akuifer yang berada diantara dua lapisan penyekap. Air tanah tertekan ditemukan saat dilakukan pengeboran tanah ditandai dengan permukaan air menyembur keluar, sedangkan air tanah yang tidak tertekan atau air tanah bebas atau lebih dikenal sebagai air tanah dangkal (*soil water*) adalah air tanah yang tidak terapit oleh lapisan penyekap. Air tanah dangkal merupakan air tanah yang dijumpai saat membuat sumur gali. Batas atas air sekaligus juga merupakan batas lajur jenuh. Air tanah (*groundwater*) bergerak melalui proses perkolasi dan kemudian mengalir ke dalam saluran atau alur air sebagai *seepage* (Rejekiingrum dkk, 2010).

Pemodelan aliran air tanah dapat membantu dalam analisis berbagai permasalahan air tanah. Pemodelan numerik air tanah digunakan dan dikembangkan secara luas untuk memahami sistem aliran air tanah, mengevaluasi setiap perubahan sumber daya air tanah, memprediksi konsekuensi irigasi air tanah dan berfungsi sebagai pedoman pengelolaan sumber daya air (Lakshmi dan Narayanan, 2015). Model air tanah yang dideskripsikan oleh komputer merupakan representasi dari keadaan yang sebenarnya di lapangan, sehingga dapat berfungsi sebagai *monitoring* dan perkiraan suatu sistem aliran air tanah di masa yang akan datang (Sahoo dan Jha, 2017).

Provinsi Sulawesi Selatan memiliki potensi sumberdaya air tanah yang cukup besar berkisar antara 56 hingga 1.484 juta m^3 /tahun (Pratiknyo, 2008). Kota Parepare merupakan salah satu kotayang memiliki potensi sumberdaya air tanah di Provinsi Sulawesi Selatan. Perkiraan jumlah airtanah dangkal sebesar 1.345 juta m^3 /tahun dan air tanah dalam sebesar 5 juta m^3 /tahun (Nurhakim dan Firdaus, 2022). Dalam Peta Cekungan Air Tanah (CAT) Indonesia yang dikeluarkan oleh Kementerian Energi Sumberdaya Mineral (ESDM), Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan tidak termasuk dalam salah satu daerah yang memiliki cekungan air tanah di Indonesia. Namun, kenyataan yang terjadi bahwa Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan memanfaatkan potensi sumber daya air tanah untuk

memenuhi kebutuhan air bersih dalam berbagai sektor. Pemanfaatan air tanah yang digunakan lebih besar dari sumber air permukaan. Pengembangan air tanah dilakukan melalui sumur galian atau sumur bor bahkan beberapa tempat sumur pemboran ditemukan dalam keadaan artesis. Hal ini menunjukkan adanya keterbatasan informasi terkait penyebaran keberadaan sistem air tanah. Untuk mendukung pengelolaan air tanah di Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan, maka diperlukan simulasi pemodelan air tanah pada sistem akuifer untuk mengetahui pembentukan sumur artesis pada akuifer tertekan. Hasil pemodelan air tanah ini di harapkan dapat memberikan gambaran mengenai kondisi hidrogeologi dan menjadi dasar dalam perumusan model konseptual cekungan air tanah Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan.

1.2 Rumusan Masalah

Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan tidak termasuk daerah yang memiliki cekungan air tanah berdasarkan peta Cekungan Air tanah (CAT) yang dikeluarkan oleh Kementerian Energi Sumberdaya Mineral (ESDM). Namun kenyataan yang terjadi di lapangan, Kota Parepare memanfaatkan dan mendayagunakan air tanah sebagai peluang dalam hal memenuhi kebutuhan sumber daya air bersih bagi masyarakat. Pemanfaatan air tanah yang digunakan lebih besar dari sumber air permukaan melalui sumur pemboran. Bahkan beberapa tempat sumur pemboran ditemukan artesis. Hal ini menunjukkan adanya keterbatasan informasi terkait penyebaran keberadaan sistem air tanah.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah, yaitu:

1. Merekonstruksi model konseptual akuifer untuk mengetahui pembentukan sumur artesis pada daerah penelitian.
2. Menganalisis aliran air tanah pada sistem akuifer tertekan menggunakan simulasi numerik pada daerah penelitian.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu dapat dijadikan sebagai acuan dan tindak lanjut dalam pengelolaan dan pengembangan potensi air tanah yang berkelanjutan di Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan. Hasil pemodelan air tanah ini juga dapat memberikan gambaran mengenai kondisi hidrogeologi dan menjadi dasar dalam perumusan model konseptual cekungan air tanah Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian dilakukan di Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan yang terletak di pesisir Selat Makassar dan berada pada bagian tengah Provinsi Sulawesi Selatan. Penelitian ini dilakukan selama 1 bulan terhitung sejak bulan Mei 2023 - Juni 2023 dengan mengumpulkan data dari hasil penelitian terdahulu yang bekerja sama dengan Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Kota Parepare Provinsi Sulawesi Selatan. Penelitian ini fokus pada pembentukan sumur artesis pada akuifer tertekan dengan berbagai pertimbangan aspek hidrologi dan hidrogeologi yang meliputi pemetaan terhadap data *log bor* sumur, data geolistrik dan sumur observasi. Analisis data *log bor* sumur dijadikan dasar dalam pembuatan model konseptual. Dilakukan analisis terhadap model konseptual dengan menggunakan beberapa *boundary condition* (kondisi batas) untuk menghasilkan aliran air tanah dan untuk mengetahui pembentukan sumur artesis daerah penelitian.

BAB II

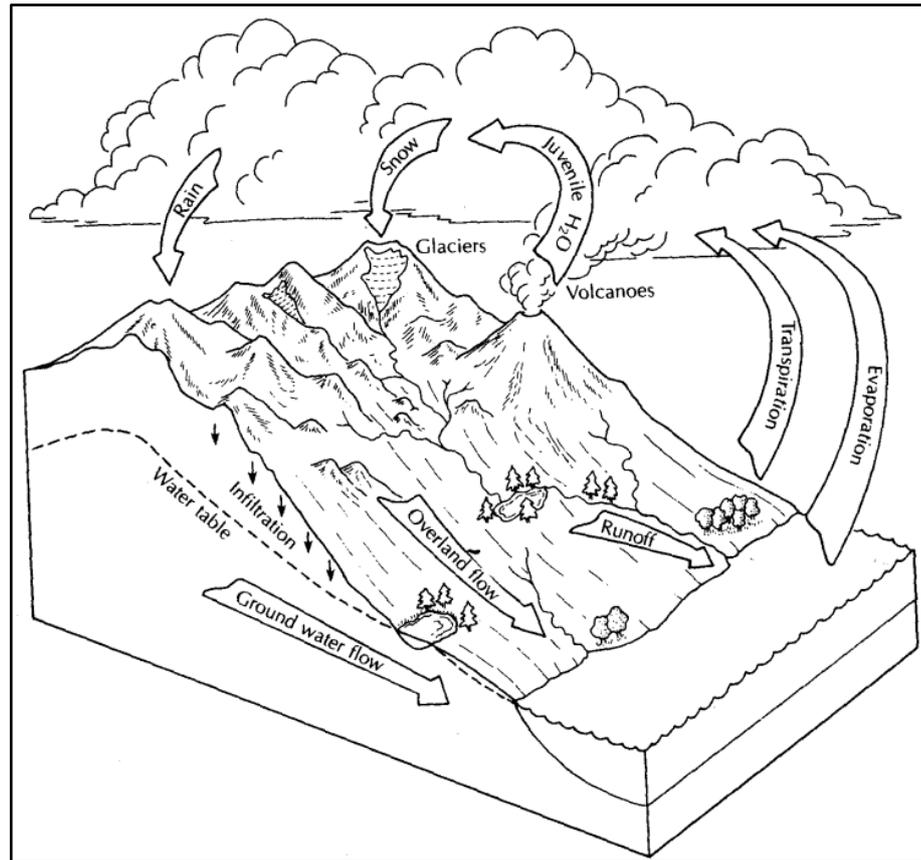
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hidrologi

Hidrologi adalah disiplin ilmu yang digunakan untuk memahami dan merancang sistem pengelolaan air yang secara langsung dan tidak langsung berhubungan dengan keberadaan air di atas dan di bawah permukaan bumi. Sistem hidrologi dapat diidentifikasi dengan menggunakan berbagai metode matematika, baik yang bersifat deterministik maupun probabilistik (Wanielista, 1990).

Hidrologi air tanah adalah cabang hidrologi yang mempelajari kejadian, pergerakan, dan kualitas air di bawah permukaan bumi. Hidrologi air tanah tidak hanya berkaitan dengan keberadaan air bawah tanah, tetapi juga terkait pergerakan air tanah. Pergerakan air tanah sebagian besar terjadi secara lambat (Heath, 1983). Hidrologi berkaitan dengan sirkulasi air dan komponennya melalui siklus hidrologi. Siklus ini berkaitan dengan curah hujan, penguapan, infiltrasi, aliran air tanah, air limpasan, aliran sungai dan pengangkutan zat terlarut atau tersuspensi dalam air yang mengalir (Maidment, 1993).

Siklus hidrologi merupakan perhitungan sederhana dari interaksi kompleks fenomena meteorologi, biologi, kimia dan geologi. Siklus hidrologi adalah pergerakan air dari air permukaan, air tanah, dan tumbuh-tumbuhan ke atmosfer dan kembali ke bumi dalam bentuk hujan (presipitasi). Perpindahan air dari jaringan tanaman ke atmosfer disebut transpirasi. Tumbuhan menyerap air dari tanah melalui sistem perakarannya. Air hujan melalui proses presipitasi dapat diserap oleh tumbuh-tumbuhan, tertampung dengan volume kecil, terinfiltrasi ke dalam tanah dan tersedia untuk di buang dalam bentuk curah hujan berlebih. Curah hujan yang meresap ke dalam tanah, bergerak atau meresap ke muka air tanah. Beberapa air tanah ini dapat mengisi kembali akuifer. Beberapa air yang terinfiltrasi dapat menguap atau mengalir ke arah permukaan. Siklus hidrologi menggambarkan pergerakan air yang menerus di atas dan di bawah permukaan bumi. Konsep siklus hidrologi sangat penting untuk memahami sumber daya air dan pengelolaan pasokan air. Siklus hidrologi merupakan siklus yang dinamis dan berulang (Wanielista, 1990). Siklus hidrologi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Siklus hidrologi (Fetter, 2001)

Siklus hidrologi terdiri dari dua fase yaitu fase atmosfer dan fase terestrial. Fase atmosfer menggambarkan pergerakan air sebagai gas (uap air) dan cair atau padat (hujan dan salju) di atmosfer, sedangkan fase terestrial menggambarkan pergerakan air di dalam, di atas dan melalui bumi. Fase terestrial dibagi menjadi fase air permukaan (air limpasan dan aliran sungai) dan fase air tanah (infiltrasi, perkolasi, resapan akuifer). Siklus hidrologi terdiri atas (Easton, 2015):

1. Presipitasi

Presipitasi adalah segala jenis kondensasi uap air di atmosfer yang jatuh akibat gravitasi termasuk hujan, salju, hujan es dan kabut. Jumlah dan jenis presipitasi mempengaruhi perkembangan tanah, pertumbuhan vegetasi, dan pembentukan limpasan yang mengangkut tanah, unsur hara dan polutan.

2. Evapotranspirasi

Evapotranspirasi adalah gabungan dari evaporasi dan transpirasi. Proses evaporasi (penguapan) adalah pergerakan air langsung ke atmosfer sebagai uap air dari permukaan, seperti tanah atau badan air, sedangkan proses transpirasi adalah proses penguapan pada tumbuhan yang mengangkut air

dari tanah ke daun dan di lepaskan ke atmosfer sebagai uap air. Karena sulitnya memisahkan proses evaporasi dan transpirasi. Kedua proses ini terjadi secara bersamaan. Istilah ini mencakup air yang menguap langsung dari tanah, air, dan permukaan tanaman, serta air yang diserap oleh tanah melalui transpirasi tanaman.

3. Infiltrasi

Infiltrasi terjadi setelah proses presipitasi mencapai permukaan tanah. Infiltrasi adalah proses penyebaran air ke dalam tanah. Jumlah air yang terinfiltrasi dan laju infiltrasi sangat bervariasi dari satu tempat ke tempat yang lain dan bergantung pada sifat-sifat tanah seperti kadar air tanah, komposisi, kerapatan, kandungan bahan organik, permeabilitas, porositas dan adanya lapisan pembatas di dalam tanah.

4. Perkolasi

Perkolasi adalah gerakan ke bawah air yang merembes keluar dari zona akar di bawah pengaruh gravitasi. Perkolasi berada di luar jangkauan akar tanaman. Air yang merembes ke bawah melalui tanah akan menuju formasi geologi di bawahnya untuk mengisi kembali akuifer.

5. *Runoff*

Runoff disebut sebagai air limpasan. Air limpasan adalah air yang jatuh ke permukaan bumi yang akan mengalir ke tempat yang lebih rendah melalui sungai dan anak sungai. Air limpasan (*runoff*) merupakan bagian dari presipitasi yang jatuh di suatu area dengan cepat dibuang dari area tersebut melalui saluran sungai. Air limpasan dikendalikan oleh berbagai faktor, bahkan terdapat berbagai jenis limpasan yang dihasilkan bergantung pada kondisinya.

Sifat dasar air tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Keberadaan air di bumi memiliki jumlah yang sama dengan jutaan tahun yang lalu. Air hanya berubah wujud dari fase cair menjadi padat dan gas. Meskipun demikian, sumber daya air harus dilestarikan, kualitas air tetap terjaga dan penurunan kualitas air secara efektif mengurangi ketersediaan air yang tersedia untuk berbagai keperluan (Easton, 2015). Sebaran dan sumber air di bumi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sebaran dan sumber air di bumi

Sumber Air	Volume Air (m³)	Air Tawar (%)	Air Total (%)
Laut	321.000.000	-	96,5000
Glester dan Salju	5.773.000	68,700	1,7400
Air tanah	5.614.000	-	1,6900
Garam	3.088.000	-	0,9300
Segar	2.526.000	30,100	0,7600
Es tanah dan permafrost	71.970	0,860	0,0220
Danau	42.320	-	0,0130
Kelembaban Tanah	3.959	0,050	0,0010
Atmosfer	3.095	0,040	0,0010
Air Rawa	2.752	0,030	0,0008
Sungai	509	0,006	0,0002
Air Biologis	269	0,003	0,0001

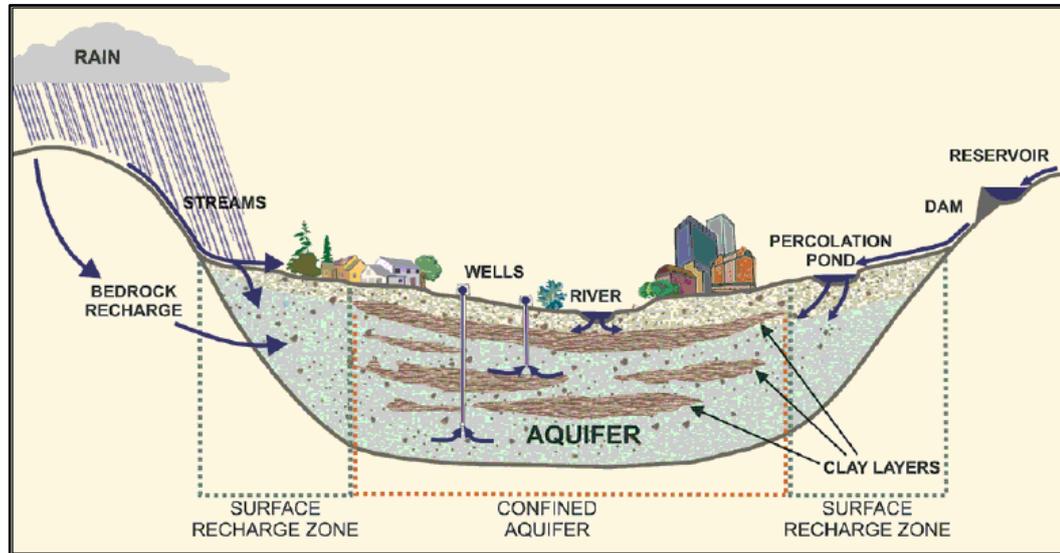
Sumber: Shiklomanov (1993)

Pengetahuan menyeluruh tentang sistem penyimpanan air (*water storage*) dan pergerakan air tanah dianggap penting untuk suatu pemahaman yang lebih baik tentang proses dan mekanisme siklus hidrologi. Air permukaan seperti aliran air sungai, air danau atau air waduk, dan genangan air lainnya dan air tanah pada dasarnya saling berhubungan satu sama lain karena keduanya mengalami proses pertukaran yang berlangsung secara terus menerus (Asdak, 2007).

2.2 Air Tanah

Air tanah adalah air yang berada di bawah permukaan tanah baik dari zona tak jenuh (*unsaturated*) dan zona jenuh (*saturated*). Air tanah bermukim di bawah permukaan tanah sebagai hasil dari air yang menyusup dari permukaan tanah dan merembes ke lapisan yang berada di bawahnya (Wanielista, 1990). Kandungan air tanah menurut perkiraan lebih dari 100 kali lebih banyak dari yang tersedia di sungai dan danau (Shiklomanov, 1993). Keberadaan air tanah ditemukan hampir di semua tempat di bumi. Air tanah dan air permukaan merupakan sumber air yang saling berhubungan satu sama lain karena sebagian besar aliran sungai dipermukaan bumi berasal dari air tanah, sebaliknya aliran air tanah merupakan sumber utama untuk imbuhan air

tanah. Pembentukan air tanah berlangsung sejalan dengan siklus pembentukan air (siklus hidrologi) di alam yang terjadi secara berurutan dan terus menerus (Kodoatie, 2012). Ilustrasi sistem air tanah di suatu Cekungan Air Tanah (CAT) yang terdiri dari beberapa akuifer dan lempung didalam kerangka hidrogeologi dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi air tanah (*California Environmental Protection Agency, 2003*)

2.2.1 Pembentukan Air Tanah

Air tanah merupakan salah satu komponen daur hidrologi (siklus hidrologi). Pembentukan air tanah berasal dari proses presipitasi air hujan yang mengalami infiltrasi melalui lapisan yang berupa media pori dan media retakan di daerah imbuhan (*recharge area*). Air yang merembes ke dalam tanah akan tersimpan dalam suatu lapisan batuan yang sering disebut sebagai akuifer dalam satu Cekungan Air Tanah (CAT) yang berada di bawah permukaan tanah menuju ke suatu daerah lepasan (*discharge area*) (Kodoatie, 2012).

Air tanah terbentuk dari air hujan dan air permukaan yang meresap (*infiltrate*) mula-mula ke zona tak jenuh (*zone of aeration/vadous zone*) dan kemudian meresap semakin dalam (*percolate*) hingga mencapai zona jenuh air (*zona of saturation*) dan terbentuk air tanah. Pada zona jenuh air ini, air tanah terdapat pada suatu lapisan batuan dan berada pada suatu cekungan air tanah. Proses pembentukan air tanah di pengaruhi oleh kondisi geologi, hidrogeologi, gaya tektonik, serta struktur bumi yang membentuk cekungan air tanah tersebut (Setianto dkk, 2021).

Air tanah berinteraksi dengan air permukaan dan komponen lainnya yang terlibat dan siklus hidrologi termasuk topografi, jenis batuan penutup, penggunaan lahan, vegetasi penutup, serta manusia yang berada di permukaan. Air tanah dan air permukaan saling berhubungan dan berkaitan satu sama lain (Soemarto, 1987). Sebagai lapisan kulit bumi, lapisan pembawa air tanah membentang sangat luas menjadi seperti reservoir dalam tanah. Lapisan pembawa air tanah dikelompokkan sesuai dengan kemampuan masing-masing lapisan dalam membawa air yaitu (Todd, 1980):

- a. Akuifer, formasi geologi yang tersusun oleh material bersifat permeabel atau dapat ditembus air, sehingga dapat menyimpan dan mengalirkan air dalam jumlah besar pada sumur dan mata air. Contohnya batupasir.
- b. Akuiklud, lapisan yang tersusun dari material kedap air (*impermeable*), sehingga tidak mampu meloloskan air. Akuiklud merupakan formasi geologi yang mungkin mengandung air akan tetapi dalam Kondisi alami tidak mampu mengalirkannya. Untuk keperluan praktis, lapisan akuiklud dipandang sebagai lapisan kedap air. Contoh batumannya adalah batulempung, serpih, tuf halus dan batulanau.
- c. Akuifug, lapisan yang tersusun oleh formasi kedap air, kompak dan bersifat tidak dapat mengalirkan air. Contoh batumannya adalah granit, batuan kristalin, metamorf kompak seperti lempung pasiran.
- d. Akuitar, lapisan yang dapat menyimpan air tetapi memiliki permeabilitas rendah, sehingga dapat mengalirkan air dalam jumlah sedikit. Akuitar di sebut juga sebagai formasi geologi semi kedap, mampu mengalirkan air tetapi dengan laju yang sangat lambat jika dibandingkan dengan akuifer. Meskipun demikian dalam daerah yang sangat luas, mungkin mampu membawa sejumlah besar air antara akuifer yang satu dengan yang lainnya. Contoh batumannya adalah batulempung pasiran.

2.2.2 Jenis-Jenis Air Tanah

Air tanah secara umum dibagi menjadi dua kategori yaitu *vadodose water* yang berada pada zona *vadose* (zona dekat permukaan tanah yang tidak jenuh air) dan *ground water* pada zona *phreatic* (zona lebih dalam dan jenuh air). Batas antara

kedua zona itu disebut *water table* atau batas muka air yang didefinisikan sebagai permukaan air pada pori batuan yang memiliki tekanan yang sama dengan tekanan atmosfer (Fitss, 2002).

Air tanah dapat dikelompokkan berdasarkan letaknya pada permukaan tanah terdiri atas tiga golongan yaitu air tanah dangkal, air tanah dalam, dan mata air sebagai berikut (Sutrisno dan Totok, 2002):

a. Air tanah dangkal

Air tanah dangkal terbentuk karena adanya daya proses peresapan air dari permukaan tanah. Proses pembentukan air tanah dangkal berawal dari air permukaan yang masuk dan meresap ke dalam tanah melalui lapisan-lapisan tanah. Air akan terkumpul pada suatu tempat atau lapisan yang rapat air. Biasanya air tanah dangkal terkumpul pada kedalaman 15 meter.

b. Air tanah dalam

Air tanah dalam berada pada lapisan setelah lapisan rapat yang pertama. Untuk mengambil atau memanfaatkan air tanah tersebut maka harus menggunakan mesin bor yang dapat mencapai lapisan dimana air tanah tersebut berada dan memasukkan pipa ke dalamnya. Kedalaman air tanah dalam biasanya mencapai 100-300 meter di bawah permukaan tanah.

c. Mata air

Mata air adalah air tanah yang keluar dengan sendirinya ke permukaan tanah. kuantitas mata air yang keluar dari dalam tanah hampir tidak berpengaruh musim, kualitasnya juga hampir sama dengan air tanah dalam.

Semua air bawah permukaan berasal dari *presipitasi*, akan tetapi jumlah air tanah yang nisbi kecil, berasal dari sumber lain. Konsep penggolongan air tanah dan asal muasal air tanah dibagi menjadi empat tipe yaitu (Seyhan, 1990):

a. Air meteorik

Air meteorik berasal dari atmosfer dan mencapai kejenuhan baik secara langsung maupun tidak langsung. Secara langsung melalui infiltrasi pada permukaan tanah dengan cara kondensasi uap air (bisa diabaikan), secara tidak langsung oleh perembesan influen dari danau, sungai, saluran buatan dan lautan.

b. Air *juvenil*

Air *juvenil* merupakan air baru yang ditambahkan dari kerak bumi yang dalam. Menurut sumbernya air ini terdiri atas air *magmatic*, air gunung api dan air kosmik (air yang dibawa oleh meteor).

c. Air diremajakan (*Rejuvenated*)

Air *rejuvenated* merupakan air yang telah dikeluarkan dari daur hidrologi oleh pelapukan maupun oleh sebab lain untuk sementara waktu dan akan kembali lagi dengan proses-proses metamorfisme, pemadatan atau proses-proses lain yang serupa.

d. Air konat

Air konat berupa air yang terjebak pada batuan sedimen atau gunung pada saat mulanya. Air konat memiliki salinitas yang lebih tinggi dari air laut.

2.2.3 Pergerakan Air Tanah

Aliran air tanah biasanya sangat lambat dan berupa aliran laminar. Aliran turbulen air tanah dapat terjadi di bawah tanah yang terbentuk di bebatuan seperti gua batu kapur dan tanah berkerikil. Dalam aliran laminar, pergerakan air tanah tidak dipengaruhi oleh daya tarik molekul dinding aliran. Partikel air akan menjauh dari dinding aliran dan bergerak lebih cepat karena resistensi terhadap gerakan menurun menuju pusat bukaan. Aliran air tanah tercepat terjadi di bagian tengah (Lee, 1995).

Pergerakan aliran air tanah dipengaruhi beberapa faktor seperti perbedaan kondisi energi di dalam air tanah, kelulusan lapisan pembawa air, dan kekentalan (*thickness*) air tanah. Air tanah memerlukan energi untuk bergerak mengalir melalui ruang antar butir. Energi penggerak ini bersumber dari energi potensial yang dicerminkan dari tinggi muka airnya (*piezometric*) dari tinggi ke rendah (Setianto dkk, 2021).

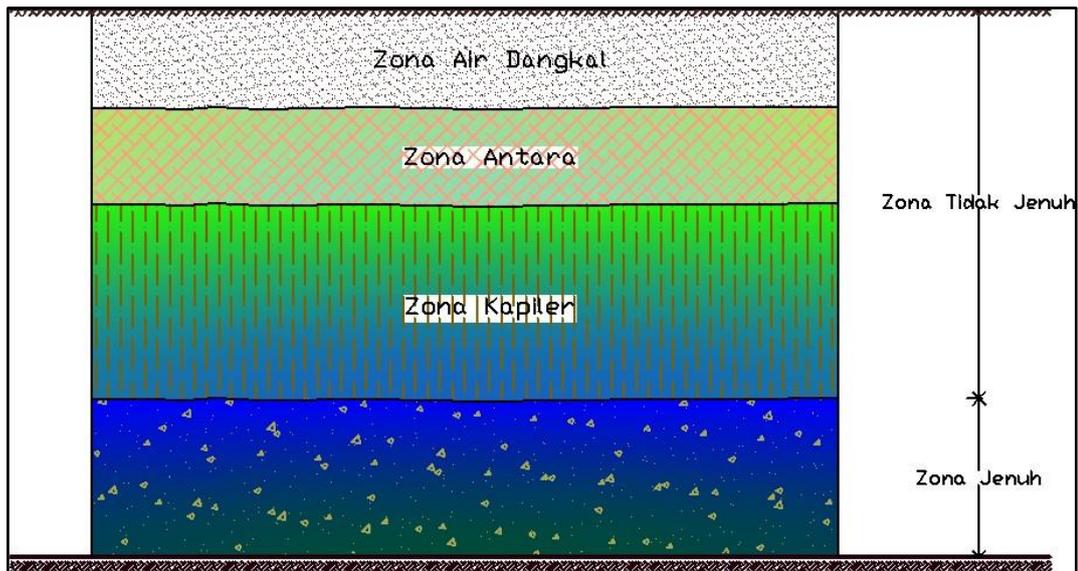
Energi yang menyebabkan air tanah mengalir berasal dari gaya gravitasi bumi. Akibat adanya gaya adhesi butiran tanah pada zona tidak jenuh air (*zone of aeration*) menyebabkan pori-pori tanah terisi air dan udara dalam jumlah yang berbeda. Gravitasi akan menarik air ke bawah (*water table*), kemudian air akan merembes ke dalam tanah menuju ke titik pembuangan (sungai, danau, dan mata air). Pergerakan aliran air tanah membutuhkan kemiringan (*gradien*) untuk mengalir sama seperti air permukaan. Kemiringan (*gradien*) tersebut dikenal

sebagai gradien hidrolik diukur sebagai perbandingan jarak vertikal antara titik aliran masuk dan aliran keluar disebut sebagai “*head*” dengan panjang aliran dari dua titik (Lee, 1995).

2.2.4 Penyebaran Vertikal Air Tanah

Tanah terdiri atas zona tekanan pori positif dan zona tekanan pori negatif. Kedua zona ini dipisahkan oleh garis disebut sebagai garis permukaan tanah yang memiliki tekanan hidrostatik sama dengan tekanan atmosfer. Zona tekanan pori positif berada di bawah muka air tanah dan dalam kondisi jenuh, sedangkan zona tekanan pori negatif berada di atas muka air tanah dalam keadaan tidak jenuh (Hardiyatmo, 2006). Gambar 3 menunjukkan distribusi aliran air tanah secara vertikal ke bawah permukaan tanah terdiri atas zona jenuh dan zona tidak jenuh (Bisri, 1991).

- a. Zona jenuh (*zona of Saturation*), semua rongga atau pori berisi air dan bagian bawah zona ini merupakan lapisan kedap air seperti tanah liat atau batuan dasar (*bedrock*). Air pada zona jenuh disebut sebagai air tanah. Air yang ditampung dalam zona ini adalah air yang ditahan oleh lapisan setempat terhadap gaya gravitasi.
- b. Zona tidak jenuh (*zona of Aeration*), terletak di atas zona jenuh sampai ke permukaan tanah. Air pada zona tidak jenuh disebut sebagai air mengambang atau air dangkal. Zona tidak jenuh terdiri atas zona dangkal, zona antara dan zona kapiler.



Gambar 3. Penyebaran vertikal air tanah (Bisri, 1991)

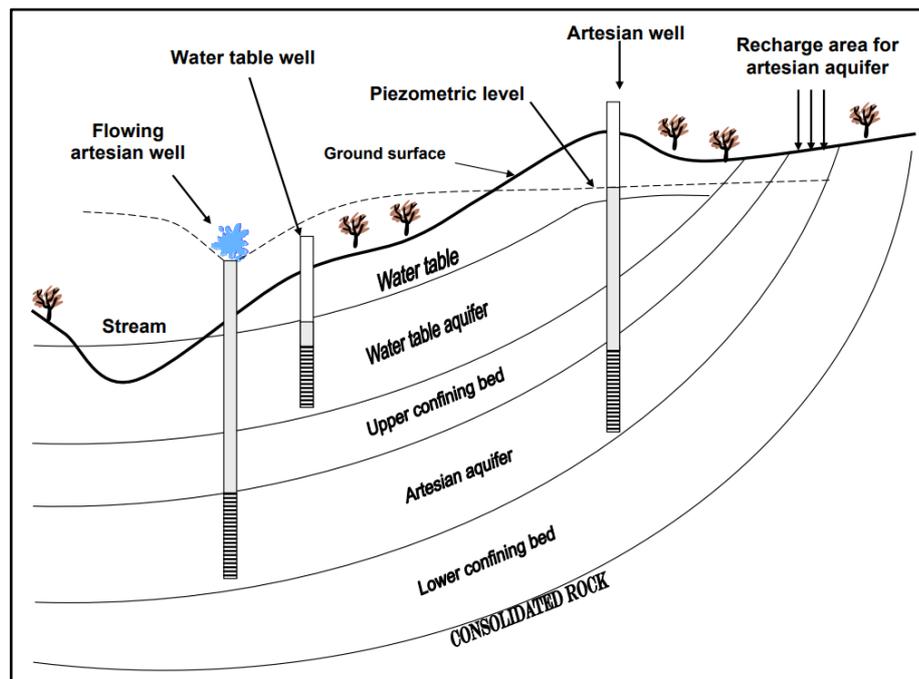
2.3 Sumur Artesis

Sumur aliran artesis adalah sumur air yang memiliki tekanan pada akuifer yang menyebabkan air tanah muncul di atas permukaan tanah sehingga terjadi aliran air tanah tanpa adanya pemompaan. Berbagai metode yang digunakan untuk membangun sumur sekaligus mengontrol debit airnya (Gaber, 2005).

Air tanah artesis berasal dari akuifer tertekan (*confined aquifer*). Air tanah artesis terbentuk karena adanya tekanan air yang lebih tinggi tetapi dibatasi oleh akuiklud di atasnya. Apabila piezometer dipasang di akuifer artesis, air di dalam tabung piezometer akan naik ke elevasi yang lebih tinggi dari lapisan artesis yang lebih dalam daripada lapisan yang lebih dekat ke permukaan bumi. Keberadaan air tanah artesis harus dikelola dan dikembangkan dengan baik (Lee, 1995).

Karakteristik sumur artesis ditandai dengan adanya aliran air yang naik menuju titik tertinggi pada akuifer. Apabila air naik di atas permukaan tanah, maka disebut sebagai sumur mengalir (*flowing well*) atau sumur artesis yang mengalir (*flowing artesian well*). Semua sumur yang mengalir disebut artesis, tetapi tidak semua sumur artesis adalah sumur yang mengalir. Pada lapisan akuifer, baik itu akuifer bebas (*unconfined aquifer*) maupun akuifer tertekan (*confined aquifer*) permukaan air akan naik dan turun sebagai respon terhadap volume air di dalam ruang pori akuifer. Peristiwa pengisian ulang akuifer dan pengambilan air tanah sangat mempengaruhi tinggi muka air tanah (Gaber, 2005).

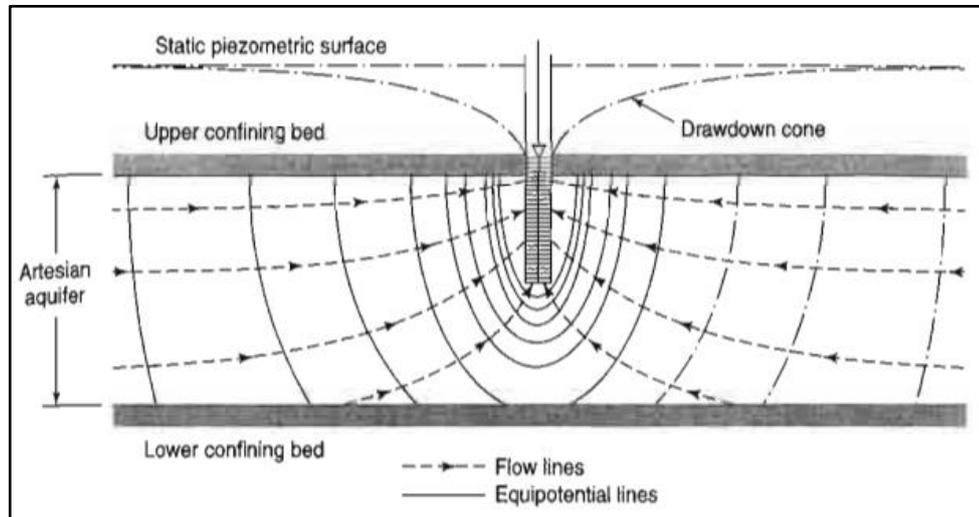
Sumur pemompaan dalam formasi tertutup, aliran air ke dalam dalam sumur merupakan hasil dari kompresi dan penurunan potensiometri matriks akuifer, karena ketinggian air akuifer artesis dapat dipengaruhi oleh tekanan udara (barometrik). Kekeruhan dan fluktuasi laju aliran air tanah artesis biasanya terjadi selama musim hujan. Ketinggian dan beban adalah dua gaya hidrogeologi terpisah yang menjelaskan pembentukan aliran sumur artesis. Kondisi artesis dapat dikontrol secara geologis dan topografis. Kondisi artesis secara geologis dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Skenario geologis sumur artesis (Gaber, 2005)

Sumur artesis menembus akuifer tertekan (*confined aquifer*) karena lapisan atas material geologis memiliki konduktivitas hidrolis (permeabilitas) yang lebih rendah. Lapisan kedap air ini disebut akuiklud. Selain itu, material geologis lain yang menyebabkan kondisi artesis adalah lapisan yang bersifat permeabel yang mentransmisikan air secara vertikal yang disebut sebagai akuitar. Air yang berada pada lapisan akuifer tertekan (air artesis) dipisahkan dari atmosfer oleh bahan-bahan yang tidak dapat ditembus oleh air. Zona intrusi yang berada pada ketinggian yang lebih tinggi dari sumur pengeboran menyebabkan pemuatan dan tekanan hidrolis yang memampatkan air di dalam lapisan akuifer tertekan. Berat lapisan akuiklud dan lapisan akuitar yang berada di atasnya juga dapat memberikan tekanan pada air. Apabila selubung sumur menembus lapisan kedap air dan mencapai

akuifer artesis, maka tekanan akan dilepaskan dan air naik di atas selubung sumur karena mencari kesetimbangan dengan ketinggian muka air tanah pada pengisian akuifer (Gaber, 2005). Distribusi aliran sumur artesis pada lapisan akuifer dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Distribusi aliran sumur artesis (Todd, 1980)

Topografi dapat mempengaruhi kondisi hidrogeologi di suatu daerah dan dapat menjadi faktor pengendali dalam produksi sumur-sumur yang mengalir. Pada akuifer bebas, sumur yang mengalir dapat terjadi ketika *intake* sumur (*screen*) cukup dalam untuk memotong zona dimana tekanan hidrolik lebih tinggi dari permukaan tanah (Gaber, 2005).

Sumur artesis terbentuk karena adanya tekanan yang tinggi pada sumur pengeboran yang memaksa permukaan air sumur untuk naik ke atas permukaan tanah. Mengontrol aliran artesis dapat menghemat energi air tanah, mempertahankan tekanan dalam akuifer dan mencegah kerusakan lingkungan alam seperti banjir, erosi, dan dampak terhadap air permukaan. Sumur artesis yang mengalir dapat menyebabkan kerusakan besar serta menimbulkan biaya yang signifikan dan tak terduga jika tidak direncanakan dengan baik sesuai prosedur (Coldstream, 2018).

2.4 Sistem Akuifer

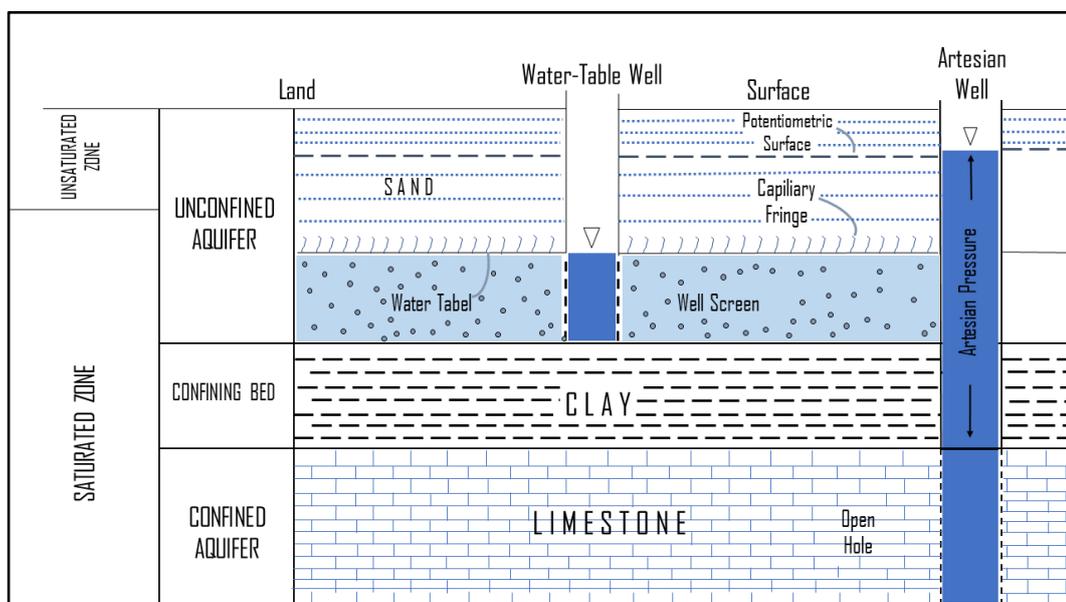
Akuifer adalah tanah atau batuan yang mengandung air yang dapat melepaskan air dalam jumlah yang cukup untuk membuatnya layak secara ekonomi untuk dikembangkan sebagai persediaan air. Akuifer dapat terkekang atau tidak terkekang

bergantung pada ada atau tidaknya muka air tanah atau permukaan air bebas di bawah tekanan atmosfer (Wanielista, 1990).

Tanah dan batuan yang dapat mentransmisikan air dengan mudah melalui pori-pori dan rekahannya masing-masing disebut sebagai akuifer. Beberapa contoh akuifer seperti kerikil, pasir, batupasir, batukapur, batuan vulkanik, batuan beku, dan batuan metamorf yang retak. Lapisan akuifer dapat diidentifikasi berdasarkan hasil uji pengeboran, *logging*, dan prospeksi geologis (Lee, 1995).

Akuifer dalam keilmuan geologi merupakan suatu formasi yang mengandung air cukup jenuh dengan material bersifat permeabel serta mampu mengalirkan atau mengeluarkan sejumlah air melalui pengeboran dan mata air. Akuifer mempunyai kemampuan untuk menyimpan (*to store*) dan meloloskan (*to transmit*) air. Tidak semua batuan dapat bersifat akuifer melainkan batuan yang mempunyai porositas dan permeabilitas cukup untuk melakukan penyimpanan dan meloloskan air (Suryana dkk, 2019).

Lapisan akuifer merupakan formasi batuan yang memungkinkan lebih banyak air untuk melewatinya dan dapat digunakan di sumur dan mata air karena berupa sedimen terkonsolidasi. Lapisan akuifer memiliki konduktivitas hidrolis sangat rendah yang membatasi pergerakan air tanah baik yang masuk maupun yang keluar dari akuifer yang berdekatan. Sistem akuifer dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Sistem akuifer bebas dan tertekan (Heath, 1983)

2.4.1 Jenis-Jenis Akuifer

Secara garis besar terdapat dua jenis media penyusun akuifer yaitu sistem media berpori dan sistem media rekahan. Kedua sistem ini memiliki karakter air tanah yang berbeda satu sama lain. Pada sistem media berpori, air tanah mengalir melalui rongga antara butir yang terdapat dalam satu *alluvial*. Sistem media rekahan, air mengalir melalui rekahan pada batuan yang dipengaruhi oleh gaya tektonik yang kuat, seperti batugamping, batuan metamorf, dan lava. Rekahan tidak hanya disebabkan oleh proses tektonik, tetapi juga oleh proses pelarutan (Robert, 2012).

Berdasarkan susunan lapisan geologi (litologi) dan besarnya koefisien kelulusan air (K), akuifer dapat dibedakan menjadi empat macam yaitu akuifer bebas (*unconfined aquifer*), akuifer tertekan (*confined aquifer*), akuifer setengah tertekan (*semiconfined aquifer*) dan akuifer menggantung (*perched aquifer*) (Suharyadi, 1984):

a. Akuifer bebas (*unconfined aquifer*)

Akuifer bebas disebut juga sebagai akuifer tidak tertekan merupakan akuifer jenuh air yang dibatasi oleh lapisan akuitar pada bagian bawah sedangkan pada bagian atas di batasi oleh muka air tanah. Ciri khusus dari akuifer bebas ini adalah muka air tanah yang sekaligus juga merupakan batas atas dari zona jenuh akuifer tersebut, sering di sebut sebagai akuifer dangkal.

b. Akuifer tertekan (*confined aquifer*)

Akuifer tertekan merupakan akuifer jenuh air yang dibatasi oleh lapisan akuiklut pada bagian atas dan bawah akuifer dan memiliki tekanan air yang lebih besar dari tekanan atmosfer. Muka air tanah dalam kedudukan ini disebut pisometri yang berada di atas muka maupun di bawah muka tanah. apabila tinggi pisometri ini berada di atas muka tanah, maka air sumur yang menyadap akuifer ini akan mengalir secara bebas. Air tanah dalam kondisi demikian disebut sebagai *artois* atau artesis. Ditinjau dari dari kelulusan lapisan pengurungnya akuifer tertekan dapat dibedakan menjadi akuifer setengah tertekan (*semi-confined aquifer*) dan akuifer tertekan penuh (*confined aquifer*) dan dapat disebut sebagai akuifer dalam.

c. Akuifer setengah tertekan (*semiconfined aquifer*)

Akuifer setengah tertekan merupakan akuifer yang dibatasi oleh lapisan atas berupa akuitar dan lapisan bawahnya berupa akuiklud. Pada lapisan pembatas di bagian atas karena bersifat awuitar masih ada aliran yang mengalir ke akuifer tersebut (*influx*) walaupun hidrolik konduktivitasnya lebih kecil dibandingkan hidrolik konduktivitas akuifernya.

d. Akuifer menggantung (*perched aquifer*)

Akuifer menggantung merupakan akuifer yang massa air tanahnya terpisah dari air tanah induk. Dipisahkan oleh lapisan yang relatif kedap air yang begitu luas dan terletak di atas daerah jenuh air. Biasanya akuifer ini terletak di atas suatu lapisan formasi geologi yang kedap air.

2.4.2 Sifat Hidrolik Akuifer

Setiap jenis batuan memiliki nilai permeabilitas yang berbeda dengan jenis batuan yang lainnya. Hal ini mempengaruhi kemampuan akuifer untuk menyimpan dan menghasilkan sejumlah air dalam kondisi alami, Besarnya cadangan air tanah atau sifat produk yang tersimpan didalam akuifer sangat ditentukan oleh sifat fisik batuan penyusun akuifer (struktur butir penyusunnya) (Herlambang, 1996).

Sifat-sifat lapisan akuifer dapat dibagi menjadi beberapa yaitu porositas, konduktivitas hidrolik, transmisibilitas, *storativity*, *specific storage* dan *specific yields*. Penjelasan sifat-sifat lapisan akuifer sebagai berikut:

a. Porositas (n)

Porositas adalah semua lubang yang tidak terbatas ukurannya pada suatu massa batuan yang memungkinkan bisa terisi oleh air (Todd, 1980). Porositas dapat diartikan sebagai perbandingan antara volume ruang antar butir terhadap volume total batuan. Persamaan porositas sebagai berikut:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

dimana:

n = Porositas (%)

V_v = Volume ruang

V = Volume total batuan

Porositas tergantung pada kebundaram pemilahan (*sorting*) dan kompaksi. Batuan dengan butir yang semakin membesar dan *sorting* yang baik

menyebabkan porositas yang besar, sedang kompaksi akan memperkecil porositas. Porositas dari beberapa macam batuan dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Porositas batuan

Batuan	Porositas (%)
Tanah	50 - 60
Lempung	45 - 55
Lanau	40 - 50
Campuran kerikil kasar dan menengah	50 - 40
Pasir seragam	30 - 40
Campuran pasir halus dan menengah	30 - 35
Kerikil	30 - 40
Kerikil dan Pasir	20 - 35
Batupasir	10 - 20
Batugamping	1 - 10
Serpih	1 - 10

Sumber: Todd (1980)

b. Konduktivitas hidrolis (K)

Konduktivitas hidrolis (permeabilitas) adalah koefisien perbandingan yang menjelaskan tingkatan dimana air dapat bergerak melalui media permeabel (Fetter, 2001). Permeabilitas adalah unit kecepatan dari kemampuan lapisan batuan untuk meloloskan air. Permeabilitas menunjukkan parameter hidrolis yang menyatakan ukuran jumlah air yang dapat diteruskan oleh media porous persatuan luas penampang. konduktivitas hidrolis dipengaruhi oleh porositas, ukuran butir dan distribusinya. Satuan konduktivitas hidrolis dalam cm^3/detik atau m^3/hari . Hasil percobaan tersebut dituliskan sebagai berikut:

$$Q = -KA \left(\frac{h_a - h_b}{L} \right) \dots \dots \dots (2)$$

dimana:

Q = Debit air yang masuk (m^3/s)

K = konduktivitas hidrolis (m/s)

A = Luas penampang (m^2)

L = Panjang penampang (m)

h_a = Tinggi air awal (m)

h_b = Tinggi air akhir (m)

Rumus hukum *Darcy* dapat juga dituliskan dengan persamaan berikut:

$$Q = -KA \left(\frac{dh}{dl} \right) \dots \dots \dots (3)$$

Dimana untuk dh/dl adalah gradient hidrolik. Berdasarkan rumus di atas maka diperoleh persamaan konduktivitas hidrolik sebagai berikut:

$$K = \left(\frac{-Q}{A \left(\frac{dh}{dl} \right)} \right) \dots \dots \dots (4)$$

Nilai konduktivitas hidrolik akan dipengaruhi oleh karakter fisik yang dimiliki oleh media tersebut diantaranya adalah besar butir, jumlah rekahan yang dimiliki, porositas, keseragaman butir dan penyebaran (*sorting*) butiran. Nilai konduktivitas hidrolik dari beberapa jenis batuan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai konduktivitas hidrolik batuan

Batuan	Konduktivitas		Batuan	Konduktivitas	
	Hidrolik (m/hari)			Hidrolik (m/hari)	
Kerikil pasir	150		Lempung	0,0002	
Kerikil menengah	270		Batugamping	0,94	
Kerikil	450		Dolomit	0,001	
Pasir kasar	45		Sekis	0,2	
Pasir menengah	12		Batusabak	0,00008	
Pasir halus	2,5		Tuff	0,2	
Batupasir menengah	3,1		Basalt	0,01	
Batupasir halus	0,2		Gabro lapuk	0,2	
Lanau	0,08		Granit lapuk	1,4	

Sumber: Todd (1980)

Nilai konduktivitas hidrolik untuk beberapa litologi batuan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai konduktivitas hidrolis litologi batuan

Batuan	Konduktivitas Hidrolis (m/s)
Lempung tufa	$1 \times 10^{-7} - 4,7 \times 10^{-9}$
Batuan beku massif	$3 \times 10^{-14} - 2 \times 10^{-10}$
Breksi vulkanik (Formasi Cikapundung)	4×10^{-6}
Breksi vulkanik (Formasi Cikidang)	$1,1 \times 10^{-6}$
Tufa	$1,2 \times 10^{-5} - 4,6 \times 10^{-10}$
Pasir tufa	$1 \times 10^{-4} - 4,7 \times 10^{-7}$

Sumber: Maria (2008)

c. Transimisivitas (T)

Transimisivitas adalah kemampuan akuifer untuk meneruskan air melalui suatu bidang vertikal setebal akuifer dengan lebar satu satuan panjang dan satu unit landaian hidrolis (Todd, 1980). Satuan transimisivitas adalah m^2/jam atau $m^2/hari$. Persamaan transimisivitas (T) sebagai berikut:

$$T = K \cdot b \dots \dots \dots (5)$$

dimana:

T = Transimisivitas (m^2/s)

K = konduktivitas hidrolis (m/s)

b = Tebal akuifer (m)

Pemompaan air tanah dari akuifer yang mempunyai nilai transimisivitas yang besar menyebabkan sifat depresi air tanah dangkal tetapi radiusnya luas sedangkan sebaliknya apabila nilai transimisivitas kecil maka depresi air tanah relative lebih dalam namun radiusnya sempit.

d. *Storativity* (S)

Storativity adalah volume air yang dapat disimpan atau dilepaskan oleh suatu akuifer setiap satu luas akuifer pada satu satuan perubahan kedudukan muka air tanah atau bidang pisometri. Nilai kisaran *storativity* antara $10^{-5} - 10^{-3}$. Nilai *storativity* pada akuifer bebas berbeda dengan nilai pada akuifer tertekan (Todd, 1980). Persamaan *storativity* (S) sebagai berikut:

$$S = S_y + h S_s \dots \dots \dots (6)$$

dimana:

$S = \text{Storativity}$

$h = \text{Ketebalan akuifer yang penuh dalam air (m)}$

$S_y = \text{Specific Yield}$

$S_s = \text{Specific Storage (m}^{-1}\text{)}$

e. *Specific Storage (S_s)*

Specific Storage adalah volume air dan formasi yang penuh dengan air yang tersimpan atau keluar dari penyimpanannya karena adanya gaya tekan dan akuifer dan gaya tekan dari air untuk setiap unit perubahan muka air tanah (Todd, 1980). Persamaan *specific storage* sebagai berikut:

$$S_s = \rho_w g (\alpha + n\beta) \dots \dots \dots (7)$$

dimana:

$S_s = \text{Specific Storage (m}^{-1}\text{)}$

$\rho_w = \text{Massa jenis air (kg/m}^3\text{)}$

$g = \text{Percepatan gravitasi (m/s}^2\text{)}$

$\alpha = \text{Kompresibilitas akuifer (m}^3\text{/N)}$

$\beta = \text{Kompresibilitas air (m}^2\text{/N)}$

$n = \text{Porositas}$

f. *Specific Yields (S_y)*

Specific Yields adalah rasio dari volume air yang keluar dari batu yang penuh air akibat gaya gravitasi terhadap volume total dari batuan. Satuan *specific yields* adalah persen (%) (Todd, 1980). Persamaan *specific yields (S_y)* sebagai berikut:

$$S_y = \frac{\Delta V}{\Delta h A} \dots \dots \dots (8)$$

dimana:

$S_y = \text{Specific Yields}$

$\Delta V = \text{Perubahan volume air dalam storage (m}^3\text{)}$

$\Delta h = \text{Perubahan Head (m)}$

$A = \text{Luas daerah aliran akuifer}$

2.5 Pemodelan Air Tanah

Model air tanah sering digunakan dalam lingkungan hidrogeologi. Simulasi aliran air tanah yang mempertimbangkan parameter dan variabilitas sifat akuifer hanya dapat dilakukan melalui pemodelan matematis. Pemodelan aliran air tanah telah diterapkan untuk mempelajari berbagai kondisi hidrogeologi. Model aliran air tanah digunakan untuk menghitung laju aliran dan arah pergerakan air tanah melalui struktur akuifer (Yang *et al*, 2011).

Pemodelan air tanah merupakan suatu peniruan dalam sebuah model dua dimensi maupun tiga dimensi kondisi air tanah dan memperkirakan adanya perubahan kondisi muka air tanah yang akan terjadi di masa mendatang akibat adanya pengembangan air tanah atau akibat adanya pengelolaan baru, baik perubahan alam maupun aktivitas manusia sehingga bisa dijadikan usulan untuk pengembangan selanjutnya. Kegiatan pemodelan air tanah diperlukan adanya karakteristik akuifer mencakup permeabilitas, porositas dan ketebalan akuifer. Karakteristik dari permeabilitas dan porositas nantinya akan menentukan nilai kelulusan hidraulis dari material penyusun. Sedangkan ketebalan akuifer akan menentukan kapasitas maksimal air tanah yang disimpan pada akuifer (Todd *and* Mays, 2015).

Pemodelan air tanah digunakan untuk mensimulasikan dan memprediksi kondisi akuifer dan perubahannya. Manfaat dari pemodelan ini adalah untuk mempresentasikan keadaan air tanah, seperti pola aliran air tanah, kuantitas dan kualitas air tanah pada waktu sekarang dan waktu yang akan datang. Pemodelan air tanah diawali dengan pengumpulan data-data mengenai kondisi geologi dan hidrogeologi pada cekungan air tanah dengan mendasar pada aspek model numerik dengan cara mendiskretisasi model dengan dimensi tertentu. Keakuratan dalam analisis dipengaruhi oleh ketelitian dalam penentuan dimensi *grid* yang mewakili setiap kondisi batas hidrolika atau hidrogeologi dan geologi, seperti batas muka air dan struktur batuan (Devy, 2016).

Terdapat beberapa aspek penting yang mempengaruhi akurasi pemodelan air tanah, yaitu (Sudinda, 2019):

- a. Keseimbangan tata air (*water balance*), sistem air tanah mempunyai masukan dan luaran, dimana masukan berupa air hujan yang merupakan imbuhan lokal

terhadap akuifer dan imbuhan yang berasal dari hulu basin akuifer. Sedangkan luaran berupa ekstraksi baik untuk domestik maupun *non-domestic* dan menjadi *baseflow* yang mengalir ke sungai.

- b. Kondisi batas (*boundary condition*), pemodelan sistem air tanah dikondisikan sebagai suatu sistem yang tertutup, dimana sistem ini mempunyai batas fisik yang jelas disebut sebagai kondisi batas yaitu suatu kondisi pada batas basin akuifer. Di batas basin dapat merupakan masukan air tanah ke dalam akuifer ataupun luaran air tanah dari akuifer ataupun suatu batas yang merupakan tembok yang tidak dapat ditembus (baik masuk maupun keluar).
- c. *Source and sinks*, yaitu penyebaran ekstraksi atau penyebaran imbuhan baik posisi, jumlah titiknya dan besarnya.
- d. Properti akuifer, yakni karakteristik akuifer yang berupa parameter tanah seperti porositas, konduktivitas hidrolis, dan kondisi geologis struktur tanahnya.
- e. Ukuran *grid block*, untuk memudahkan melakukan pemodelan maka dilakukan model *grid block* berupa bentuk geometris seperti eksagon, pentagon ataupun bujur sangkar dengan ukuran tertentu tergantung pada kondisi fisik lapangan. Besaran dimensi *grid block* ini menentukan akurasi dari hasil simulasi permodelan. Semakin kecil ukuran *grid block*, semakin akurat hasil simulasinya.
- f. Parameter model, spesifik ditentukan oleh metode pemrograman yang diterapkan, antara lain parameter interpolasi, koefisien numerik, ataupun beberapa parameter lain yang sengaja disisipkan ke dalam model yang bertujuan untuk mengatur akurasi hasil model.
- g. Kalibrasi dan validasi model, sebelum model air tanah dapat digunakan untuk prediksi, harus dilakukan kalibrasi dan validasi untuk melihat bahwa hasil simulasi yang dikeluarkan oleh model bersifat valid.

2.5.1 Pengertian Model

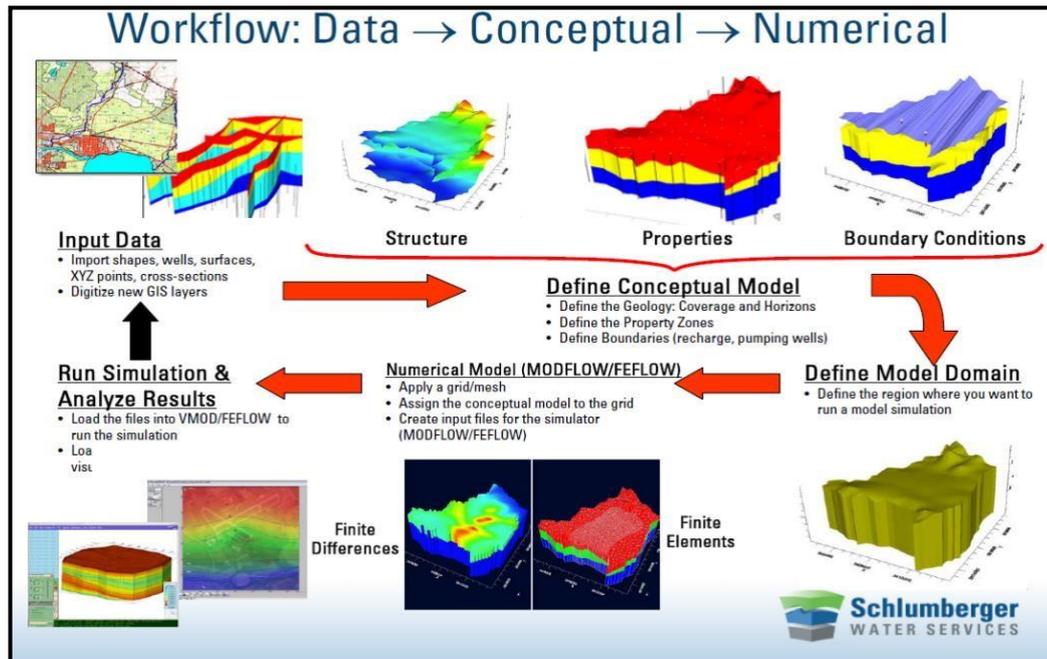
Model adalah suatu pendekatan untuk menggambarkan penyederhanaan dari suatu kondisi nyata. Penyederhanaan selalu dilakukan dalam membangun model karena keadaan nyata yang terlalu sulit untuk dipecahkan (Wang and Anderson, 1982).

Model hidrogeologi adalah sebagai sajian sederhana (*simple representation*) dari suatu sistem hidrogeologi yang kompleks. Model menunjukkan hubungan sebab akibat antar komponen dalam sistem dan antara sistem dengan lingkungannya. Dalam penyusunan model hidrogeologi dibutuhkan asumsi dan batasan-batasan tertentu serta melalui beberapa tahapan pemodelan. Hasil pemodelan akan semakin mendekati kenyataan apabila semakin banyak parameter yang ditinjau. Pemodelan hidrogeologi dapat digunakan sebagai alat untuk *monitoring* dan evaluasi dalam pengelolaan air tanah (Thomas, 2011).

Manfaat dari model hidrogeologi adalah sebagai alat dalam pengelolaan air tanah, yaitu sebagai alat bantu dalam menentukan kebijakan-kebijakan yang perlu diambil dalam rangka pengelolaan air tanah secara terpadu dengan mendasarkan hasil-hasil pemodelan dan simulasinya (Hendrayana, 1994). Simulasi dalam pemodelan yang menyangkut kelakuan sistem di bawah kondisi yang bervariasi mencakup tiga tujuan utama, yaitu:

1. Prediksi terhadap tanggapan sistem, yaitu dengan anggapan parameter sistem sudah dapat diketahui.
2. Evaluasi parameter-parameter dalam sistem, apabila tanggapan terhadap sistem telah diketahui.
3. Penentuan penekanan sistem, yaitu apabila parameter sistem dan tanggapan terhadap sistem telah diketahui atau dibatasi.

Tahapan pemodelan hidrogeologi air tanah terdiri atas tiga bagian utama yaitu akuisisi data, pengembangan konseptual model dan pemodelan numerik (Hesch, 2009) seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Tahapan pemodelan air tanah (Hesch, 2009)

Dalam tahapan pemodelan aliran air tanah hanya ditekankan pada pemodelan air tanah dengan metode numerik. Semakin kompleks suatu model yang disusun, maka semakin banyak parameter yang ditinjau dan dipakai dalam pemodelan, sehingga hasil model akan semakin mendekati kenyataan sebenarnya. Langkah-langkah yang umum ditempuh pada proses pemodelan air tanah seperti terlihat pada Gambar 6. Langkah tersebut ada tiga bagian utama yakni akuisisi data, pengembangan konseptual model serta pelaksanaan pemodelan secara numerik (Hesch, 2009).

Kebutuhan data untuk pemodelan air tanah terdiri dari kerangka hidrogeologi atau *hydrogeological framework* dan data hidrologi. Kerangka hidrogeologi yang dibutuhkan meliputi sifat fisik dari kondisi geologi meliputi topografi, litologi serta karakteristik sistem akuifer seperti ketebalan, porositas, transmisivitas, konduktivitas hidrolika serta parameter lain yang tidak berubah menurut waktu, sedangkan data hidrologi meliputi data hidrolika air yang bersifat dinamis dan data klimatologi serta penggunaan lahan. Pengumpulan data tersebut dibutuhkan dalam rangka pemahaman kondisi alami dari sistem air tanah serta proses hidrologi yang mengontrol atau memberikan dampak terhadap sistem aliran air tanah. Hal inilah yang menjadi dasar untuk membuat konseptual model. Kebutuhan data akan sangat kompleks pada suatu daerah model yang memiliki

tingkat kekompleksan kondisi geologi dan hidrogeologi. Akuisisi data dan interpretasi merupakan aktivitas yang terus berlangsung untuk melengkapi konseptual model, sehingga menghasilkan konseptual model yang akurat dan handal (Hesch, 2009).

2.5.2 Konseptual Model

Konseptual model adalah gambaran sederhana pada sistem hidrogeologi yang utama dan pelaku sistem air tanah di daerah model. Konseptual model disajikan dalam bentuk grafik berupa sayatan melintang (*cross section*) ataupun blok diagram dengan penjelasan secara deskriptif dan kuantitatif mengenai gambaran sistem. Konseptual model memberikan gambaran ideal dari pemahaman kondisi alam dan bagaimana sistem tersebut bekerja berdasarkan asumsi (Thomas, 2011). Beberapa komponen konseptual model dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Komponen konseptual model

Parameter	Data Set
Geometri Akuifer	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model elevasi digital 2. Perluasan horizontal dari satuan hidrogeologi 3. Perluasan vertikal dari satuan hidrogeologi
Properti Hidraulik	<ol style="list-style-type: none"> 1. Konduktivitas hidrolis dan transmisivitas 2. Koefisien penyimpanan
Kondisi Awal	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Leakage</i> 2. <i>Water head</i>
Kondisi Batas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ekstraksi air tanah

Sumber: Jagalke dan Barthel (2005)

Model konseptual adalah representasi sederhana dari model alami dari sistem hidrogeologi fisik dan perilaku hidrolis. Model ini merupakan dasar dari model analitik dan numerik yang diformulasikan untuk meniru kondisi asli di lapangan. Model mendasarkan pada kondisi alami dan faktor-faktor yang mempengaruhi aliran air tanah baik di sebabkan oleh keadaan alami, seperti daerah imbuhan, luahan, presipitasi, evapotranspirasi, pola aliran air (permukaan dan air tanah) dan akibat adanya kegiatan yang dapat merubah kondisi alam tersebut (Devy, 2016).

2.5.3 Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

Batas hidrologi merupakan batas yang tidak tetap bergantung pada waktu. Batas ini terdiri atas batas muka badan air seperti permukaan air laut, danau, waduk dan sungai serta batas aliran air tanah yang dapat berhimpit dengan batas aliran air permukaan seperti daerah gunung api. Tiga jenis kondisi batas yang digunakan pada dominan dari suatu model aliran air tanah sebagai berikut (Nadira, 2015):

- a. Kondisi batas tipe Dirchlet, berupa *head* hidraulik yang telah ditentukan dengan perpotongan garis lurus maupun melengkung.
- b. Kondisi batas tipe Neuman, berupa fluks aliran dengan perpotongan tegak lurus dengan *gradient* hidraulik.
- c. Kondisi batas tipe Chaucy, berupa kombinasi antara *head* dan fluks. Kondisi batas ini dapat digunakan pada batas semikedap air dan mengandung informasi hubungan antara variabel dalam persamaan dan turunannya.

Tabel 6 menunjukkan tipe kondisi batas dan contoh penggunaannya dalam pemodelan aliran air tanah.

Tabel 6. Kondisi batas model

Tipe Kondisi Batas	Kondisi Batas	Contoh Penggunaan
Dirchlet	<i>Head</i> yang telah ditentukan	Danau, Sungai, Mata air, <i>Constant-head well</i>
Neuman	<i>Fluks</i> yang telah ditentukan	Batas kedap air, batas pemisah air, infiltrasi, penguapan
Chaucy	Batas semipermeabel atau <i>fluks</i> yang tergantung <i>head</i>	<i>Leaky river, drain, deepage face</i>

Sumber: Nadira (2015)

Terdapat empat jenis Kondisi yang dapat dijadikan sebagai batas dari suatu model hidrogeologi, yaitu (Toth and Kuper, 1990):

1. Batas ketinggian yang diketahui (*prescribed head boundary*). Batas ini merupakan batas ketinggian (h) yang konstan, misalnya muka air laut, air danau, dan air sungai. Batas ini disesuaikan dengan data yang ada.
2. Batas aliran yang diketahui (*prescribed flux boundary*). Batas aliran yang dimaksud merupakan besaran nilai aliran yang sudah di ketahui. Aliran ini secara konstan memberikan distribusi debit yang tetap kepada persoalan

akuifer yang dianalisis. Apabila diketahui $q = 0$ maka $h = \text{konstan}$ dan ini disebut sebagai ketinggian konstan (*constan head boundary*).

3. Bata muka air, batas ini merupakan batas muka air yang diketahui. Dalam kondisi ini diketahui bahwa berdasarkan persamaan kontinuitas maka penambahan debit adalah konstan. Dalam hal ini pengertian secara aplikatif adalah aliran air akan terbias melalui batas yang konstruktif (muka air yang diketahui) tersebut, namun besaran debitnya akan selalu konstan.
4. Batas kedap air, yaitu suatu daerah yang kedap air (*impermeable*) sehingga aliran tidak dapat melewatinya. Sering disebut batas tanpa aliran (*non flow boundary*).

2.5.4 Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengatasi permasalahan aliran air tanah dengan cara diskret diwujudkan dalam model numerik aliran tanah. Penyelesaian secara diskretisasi domain solusi dilakukan dengan membagi daerah menjadi grid dengan ukuran X dan Y masing-masing pada sumbu X dan Y. Proses diskretisasi terdiri atas (1) deskretisasi blok atau *block centered grid*; (2) diskretisasi titik atau *mesh centered grid*. Diskretisasi blok semua nilai parameter sistem digunakan sebagai model terletak di titik tengah blok, sedangkan diskretisasi titik semua nilai parameter terletak pada ke empat sisi blok (Wang and Anderson, 1982).

2.5.5 Kalibrasi Model

Kalibrasi model dilakukan dengan cara merubah nilai parameter input model untuk mendapatkan hasil pemodelan yang sesuai dengan kondisi lapangan. Kesesuaian antara penggambaran dan model sangat dibutuhkan, oleh karena itu penggambaran yang tidak tepat akan menghasilkan model yang tidak sesuai. Kalibrasi model dapat dilakukan pada kondisi tunak dan kondisi transien. Simulasi kalibrasi pada *steady state* tidak ada perubahan nilai *hidraulik head* atau konsentrasi kontaminan. Kalibrasi model harus mencakup perbandingan antara *hydraulic head* hasil simulasi model dan kondisi lapangan (Akhadri dkk, 2016).

2.6 Program Visual MODFlow

Persebaran distribusi air tanah dapat diketahui dengan adanya pemodelan bawah permukaan dengan menggunakan perangkat lunak. Perangkat lunak Visual Modflow merupakan program komputer yang mensimulasikan aliran air tanah tiga dimensi melalui suatu pori media dengan menggunakan metode beda hingga (McDonald & Harbaugh, 1998). Program Visual Modflow bekerja dengan cara numerik. Modflow berupa perangkat lunak dengan pemodelan air tanah yang kuat, mampu mensimulasikan aliran air tanah dalam berbagai sistem alam misalnya sistem hidrologi, seperti kebocoran ke sungai, pengisian ulang dan evapotranspirasi. Visual Modflow digunakan secara luas di seluruh dunia dan dapat diterapkan pada berbagai aplikasi pemodelan (Shakoor *et.al*, 2018).

Program visual Modflow dirancang untuk memiliki struktur modular yang memfasilitasi dua tujuan utama berupa kemudahan pemahaman dan kemudahan peningkatan. Kemudahan pemahaman adalah tujuan karena umumnya dipercaya bahwa dalam pemodelan harus memahami cara kerja model untuk menggunakannya dengan benar. Sedangkan kemudahan peningkatan adalah sebuah tujuan karena pengalaman menunjukkan bahwa ada kebutuhan yang berkelanjutan akan kemampuan baru (McDonald *and* Harbaugh, 1998).

2.7 Metode Beda Hingga (*Finite Difference Method*)

Model air tanah digunakan sebagai alat untuk pengambilan keputusan dalam pengelolaan sistem sumber daya air. Model air tanah juga dapat digunakan untuk memprediksi aliran air tanah di masa depan. Beberapa teknik solusi yang baik tersedia untuk menyelesaikan persamaan pengatur model, salah satunya adalah metode beda hingga (*finite difference method*) (Igboekwe *and* Achi, 2011).

Metode beda hingga atau *finite difference method* merupakan metode penyelesaian matematika numerik yang digambarkan dalam persamaan differensial parsial (Alman, 2018). Konsep dasar metode beda hingga adalah untuk mendiskritkan domain aliran total menjadi subdomain kecil yang nyaman atau elemen dari mengevaluasi keseimbangan massa di setiap elemen (Narasimhan *and* Witherspoon, 1976).

Persamaan yang menggambarkan aliran air tanah merupakan persamaan diferensial parsial. Persamaan diferensial parsial dapat diselesaikan secara matematis dengan solusi analitik atau numerik. Namun, solusi analitik sangat sulit diimplementasikan karena membutuhkan parameter dan kondisi batas yang ideal. Kelebihan dari solusi analitik yaitu dapat menghasilkan solusi yang tepat dan mendekati kondisi sebenarnya di lapangan. Persamaan diferensial parsial menggunakan variabel kontinu diganti dengan variabel diskrit yang ditentukan di *block grid*. Juga persamaan differensial kontinu yang menentukan *head hidrolis* dalam sistem, diganti dengan jumlah *head* yang terbatas pada *grid* yang berbeda (Igboekwe *and* Achi, 2011).

Metode beda hingga dianggap sebagai metode yang paling dapat digunakan dan dipahami untuk mendapatkan solusi numerik untuk masalah aliran air tanah yang stabil dan tidak stabil. Metode beda hingga bekerja dengan melapiskan *grid-grid* yang terbatas pada domain solusi. Setiap grid diberi nomor identifikasi global dan sekitarnya dari setiap grid ini, di mana variabel dependen didekati dengan polinomial derajat hingga yang koefisiennya ditulis dalam format nilai variabel dependen yang tidak diketahui di grid sekitarnya. Oleh karena itu, polinomial digunakan untuk menurunkan perkiraan aljabar untuk persamaan diferensial parsial untuk setiap grid internal di samping pendekatan aljabar untuk kondisi batas di setiap situs grid di atas atau di dekat batas domain solusi. Setelah kita mendapatkan persamaan aljabar untuk setiap grid maka persamaan tersebut dapat diselesaikan secara bersamaan untuk mendapatkan nilai variabel dependen yang tidak diketahui pada semua grid (Baharum *et al.*, 2010).